

# Experimentelle Ermittlung der Grenzformänderungskurve im Blechdickenbereich von 2,5 bis 5,0 mm

Marko Schatz, Stefan Keller, Peter Feldmann

**Die Grenzformänderungskurve (Forming Limit Curve ) eines Blechwerkstoffes beschreibt das Versagen eines Blechwerkstoffes für verschiedene Formänderungszustände bzw. unterschiedliche Verhältnisse der Haupt- ( $\phi_1$ ) und Nebenformänderung ( $\phi_2$ ). Das Versagen des Blechwerkstoffes ist dabei durch das Auftreten einer zum Riss führenden lokalen Einschnürung gekennzeichnet.**

In der Umformsimulation werden FLC häufig als Abbruchkriterium und auch zur Bewertung der berechneten Formänderungen herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass FLC in der Regel nur lineare Dehnpfade abbilden, während bei der Berechnung von Praxisbauteilen oft auch nichtlineare Dehnpfade zu berücksichtigen sind. Als weitere Anwendungsbereiche sind die Methodenplanung, der Werkzeug-Tryout und Formänderungsanalysen im Produktionsprozess zur Bestimmung der Prozesssicherheit zu nennen.

Im Bereich der Feinbleche sind unterschiedliche Verfahren und Vorgehensweisen zur experimentellen Ermittlung der FLC bekannt. Eine grundlegende Normung dieser Vorgehensweisen ist nicht bzw. nur sehr unzureichend (ISO 12004) gegeben, so dass derzeit im Rahmen eines Arbeitskreises der IDDRG eine überarbeitete Prüfvorschrift zur Normung vorgeschlagen wird, die die experimentelle Ermittlung der FLC im Blechdickenbereich von 0,4 bis 4,0 mm beschreibt. Auf den Einfluss der Blechdicke, der sich im Allgemeinen durch die Verschiebung der FLC bei zunehmender Dicke zu höheren Werten der Formänderung  $\phi_1$  abzeichnet (Bild 1), wird in der Prüfvorschrift nicht im Detail eingegangen. Lediglich das Verhältnis der Blechdicke zum Stempeldurchmesser

wird auf einen Maximalwert von 1:25 begrenzt.

Das Grundanliegen der vorliegenden Arbeit besteht in der Untersuchung des Einflusses der Blechdicke auf die erreichbaren Grenzformänderungen im Blechdickenbereich von 2,5 bis 5,0 mm.

## Vorgehensweise

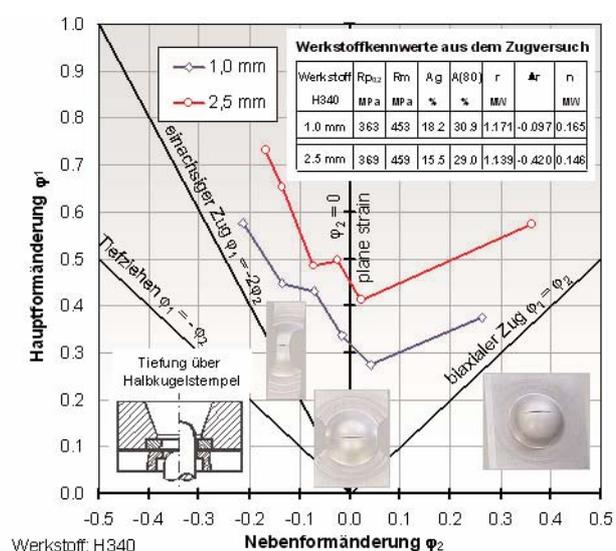
Für die experimentelle Ermittlung der FLC sind unterschiedliche Verfahren bekannt, die aufgrund ihrer Methodik

die Lage der Kurve beeinflussen bzw. diese nur teilweise abbilden können [1]. Das in Deutschland am weitesten verbreitete Verfahren ist das Ziehen von taillierten Proben über einen zylindrischen Stempel mit halbkugelförmigem Kopf ( $\phi_{St} = 100 \text{ mm}$ ), der auch im Rahmen dieser Untersuchungen verwendet (Bild 1) wird.

Mit zunehmender Blechdicke kommt es zu einem deutlich abnehmenden Verhältnis von Stempeldurchmesser zu Blechdicke ( $d_{St}/s_0$ ). Die Auswirkungen dieses Verhältnis-

**Bild 1**

Grenzformänderungskurven von Blechen unterschiedlicher Dicke



ses auf die Entwicklung der Werte der Hauptformänderung  $\phi_1$  soll durch die Verwendung unterschiedlicher Stempeldurchmesser untersucht werden und nicht durch die Verwendung unterschiedlicher Blechdicken bei konstantem Stempeldurchmesser erfolgen, da so ein Einfluss der Werkstoffeigenschaften aufgrund unterschiedlicher Dicken und Chargen ausgeschlossen werden kann.

Die zur Anwendung kommenden Stempeldurchmesser sind 58 mm, 100 mm und 200 mm. Der Stempel 100 ( $\phi_{St} = 100$  mm) ist das bekannte FLC-Standardwerkzeug und dient als Referenz. Der Stempel 58 ( $\phi_{St} = 58$  mm) stellt eine extreme Verkleinerung der zu erwartenden Verhältnisse dar und der Stempel 200 ( $\phi_{St} = 200$  mm) die gewählte Obergrenze. Die Versuche mit dem Stempel 58 und dem Stempel 100 wurden in einer Blechprüfmaschine der Fa. Roell/Amsler (BUP600) durchgeführt (Bild 2). Für die Versuche mit dem Stempel 200 erfolgte mit Unterstützung der Edscha AG im Rahmen dieser Forschungsarbeit die Konstruktion und der Bau eines Versuchswerkzeuges, welches in eine hydraulische Presse eingebaut wurde (Bild 3).

Für die Untersuchungen wurden zwei Stahl- und zwei Aluminiumwerkstoffe in unterschiedlichen Blechdicken verwendet. In Kombination mit den drei Stempeldurchmessern ergibt sich daraus ein Bereich der Verhältnisse von Stempeldurchmesser zu Blechdicke  $d_{St}/s_0 = 12 \dots 100$  (Bild 4).

Pro Werkstoff und Blechdicke wurden die erreichbaren Grenzformänderungen exemplarisch für die drei typischen Formänderungszustände „einachsiger Zug“, „Plane Strain“ und „äqui-biaxialer Zug (Streckziehen)“ charakterisiert.

## Versuchsparameter

Bei der experimentellen FLC-Ermittlung hängen die Versuchsergebnisse maßgeblich von den eingestellten Versuchsparametern ab. Dies betrifft z. B. die verwendeten Werkzeuge einschließlich deren tribologischen Eigenschaften ebenso wie die Form der Proben, deren Klemmung im Flanschbereich und die auf dem Blech aufgebrauchten Messmarken. Ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Anpassung der Versuchspara-

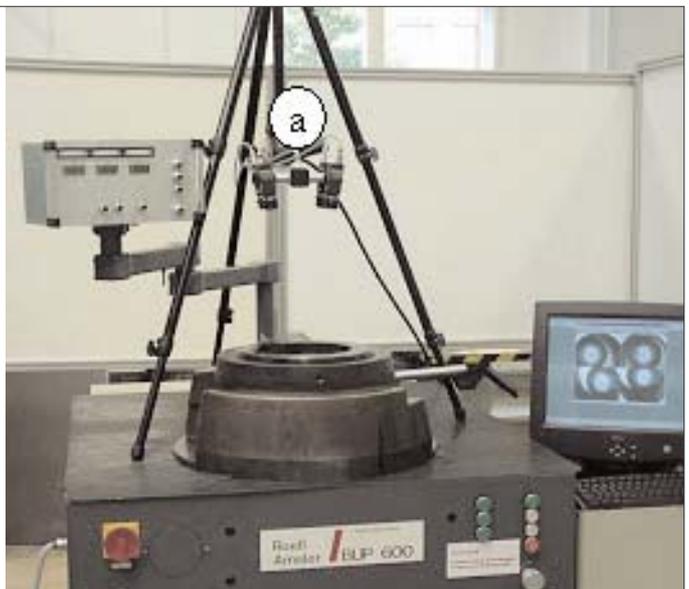
meter für die Prüfung größerer Blechdicken. Nachfolgend soll auf ausgewählte Parameter näher eingegangen werden.

Die Empfehlungen des deutschen Arbeitskreises der IDDRG [2] geben für die Markierung der Proben mit re-

gelmäßigen Linienrastern eine blechdickenabhängige Größe der Rasterelemente von 1 bis 2,5 x Blechdicke vor. Darauf basierend erfolgte die Markierung der hier untersuchten Werkstoffe mit einem 2 mm Quadratlinienraster. Die Aufbringung erfolgte

**Bild 2**

Blechprüfmaschine BUP600 für die Stempel 58 und 100



**Bild 3**

Versuchswerkzeug für den Stempel 200



durch elektrochemisches Ätzen oder durch Bedrucken mittels Siebdruckverfahren. Zur Erzielung reproduzierbarer Versuchsergebnisse sind tribologische Einflüsse weitestgehend auszuschließen, d. h. der Riss sollte eine Außermittigkeit von  $\pm 15\%$  des verwendeten Stempeldurchmessers nicht überschreiten. Durch die Verwendung dreilagiger Schmierstoffverbunde mit einer Kunststoffkernschicht konnte eine zuverlässige Rissausbildung im Kuppenpol erreicht werden. Bekannt sind Systeme mit PTFE-Folie (Teflon<sup>®</sup>) bzw. Mipolam<sup>®</sup> in Verbindung mit Lanolin (Wollfett) oder Ziehöl. Durch die Verwendung taillierter Proben unterschiedlicher Stegbreite erfolgt die Einstellung der gewünschten Formänderungszustände vom Bereich des einachsigen Zuges (schmaler Steg) bis hin zum äqui-biaxialen Zug (Vollprobe). Die Probenformen sollen einfach herstellbar sein und eine reproduzierbare Versuchsdurchführung gewährleisten. Dies beinhaltet hauptsächlich die zuverlässige Rissausbildung im Kuppenpol bei Einhaltung linearer Umformpfade. In Übereinstimmung mit dem o. g. Arbeitskreis wurde eine Probenform gewählt, die erfolgreich aus dem Bereich der Feibleche auf den Blechdickenbereich bis 5 mm übertragen werden konnte. Durch maßstäbliche Anpassungen an alle Stempeldurchmesser wurde die in Bild 8 dargestellte Probenform für die Versuchsdurchführung verwendet. Der Zuschnitt der Proben erfolgte hauptsächlich durch Wasserstrahl-schneiden. Für die Proben geringerer Blechdicken wurde ein Schneidwerkzeug eingesetzt.

### Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Versuchsdurchführung gestaltete sich in Anlehnung an die o. g. Richtlinien wie folgt: Nach der Klemmung der Probe (Verwendung von Ringzacken bzw. Klemmsicken im Niederhalterbereich) erfolgt die Umformung bis zum Riss. Der Stempel bewegt sich dabei mit einer Geschwindigkeit von ca. 1,5 mm/s. Die Auswertung der Versuche erfolgt hier mit der zeitbezogenen Vorgehensweise. Dafür wird zunächst der Werkstofffluss mittels eines über dem Stempel positionierten (Bild 2 und Bild 3) photogrammetri-

schon Systems ( $\alpha$ ), bestehend aus vier Kameras, während des Umformvorganges aufgezeichnet. Die Bildrate beträgt dabei ca. 10 Bilder/s. Anschließend erfolgt die Auswertung über die Bestimmung eines repräsentativen Bildverbandes. Dafür werden aus der aufgenommenen Videosequenz drei bis vier Aufnahmen vor Beginn des Versagens ausgewertet (Ermittlung der Formänderungsverteilung) und anhand der Formänderungsanstiege die Aufnahme ausgewählt, die den Beginn der lokalen Einschnürung charakterisiert. Für Bleche im Dickenbereich bis ca. 1,5 mm ist diese Vorgehensweise praktikabel und führt zu vergleichbaren Ergebnissen. Mit zunehmender Blechdicke erstreckt sich der Einschnürvorgang über einen längeren Zeitraum, so dass der Versagensbeginn schwer bestimmbar ist. Die Erarbeitung eines reproduzierbaren und praktikablen Kriteriums, das den Beginn der lokalen Einschnürung auch im Bereich der dickeren Bleche signalisiert, ist daher ein wesentlicher Bestandteil dieser Forschungsarbeit.

### Bestimmung des Instabilitätskriteriums

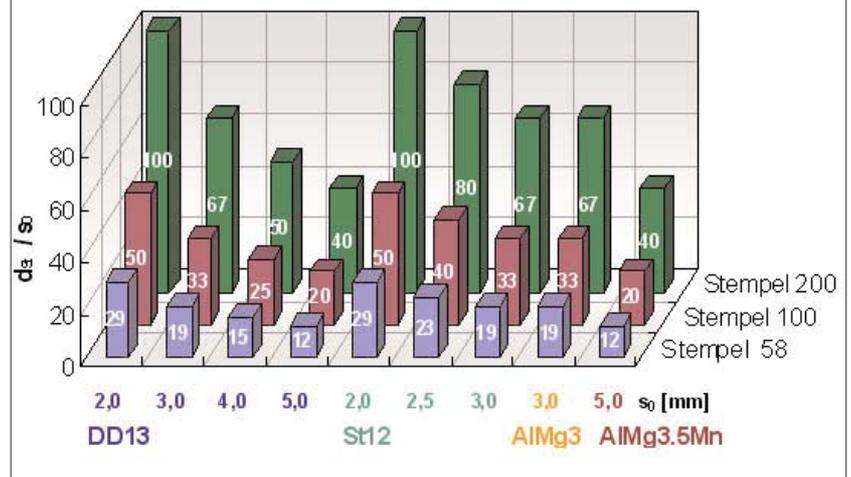
Der zeitbezogenen Auswertung liegt der Ansatz zugrunde, den Beginn der lokalen Einschnürung aus der Zeitfolge zu bestimmen und die für die Auswertung relevante Aufnahme vor Beginn der lokalen Einschnürung aus der

vorhandenen Bildsequenz festzulegen. Dafür können unterschiedliche Kriterien herangezogen werden:

- Lokalisierung der Formänderungen im späteren Rissbereich,
- verstärkter Anstieg der lokalen Formänderung  $\phi_1$  und damit Erhöhung der Formänderungsgeschwindigkeit in diesem Bereich,
- Formänderung  $\phi_2$  geht gegen Null (Anmerkung: Funktioniert nicht bei Plane Strain).

Während der Tiefung wird zunächst der gesamte Bereich über dem Stempel umgeformt. Mit fortschreitender Tiefung kommt es zu einer inhomogenen Verteilung der Formänderungen, die sich im Idealfall mittig über dem Kuppenpol konzentriert und anschließend zum Werkstoffversagen durch Einschnürung und Bruch führt. Da der Stempel über den gesamten Tiefungsvorgang mit konstanter Geschwindigkeit verfährt, bewirkt diese Lokalisierung der Umformung eine starke Erhöhung der lokalen Formänderungsgeschwindigkeit, die als Kriterium für das Eintreten der lokalen Einschnürung angenommen werden kann. Ab diesem Moment treten im Einschnürbereich ausschließlich Formänderungen senkrecht zum späteren Riss auf, so dass die Werte der Formänderung  $\phi_2$  keine Änderung mehr erfahren. Dieser Bereich der lokalen Einschnürung erstreckt sich (bei weichen Werkstoffen) auf einer Breite von ca.  $\sqrt{2} \cdot s_0$  ( $s_0$  = Ausgangs-

Bild 4 Werkstoffübersicht



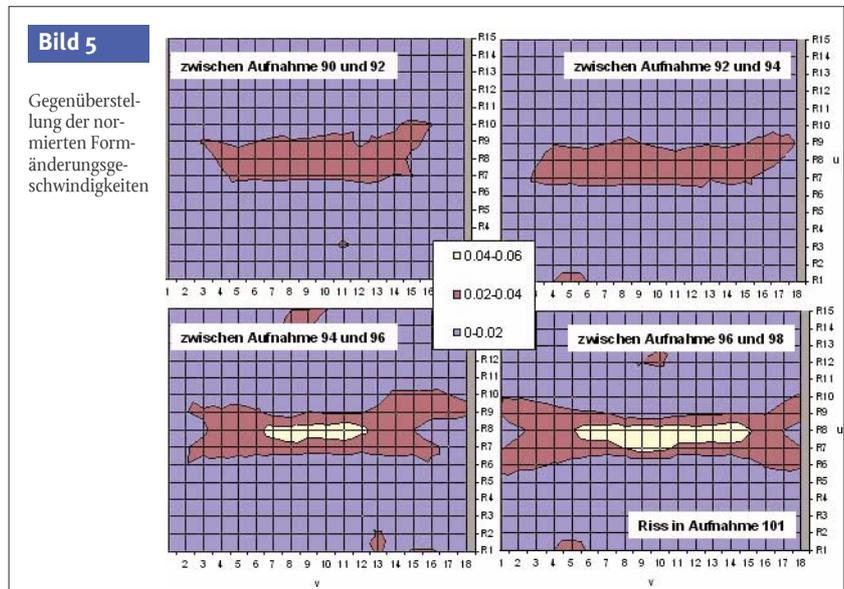
blechdicke) [4]. Die aufgeführten Kriterien können den Verlauf des Werkstoffversagens beschreiben, die Festlegung des Beginns der lokalen Einschnürung, d. h. die Definition eines Instabilitätskriteriums, ist notwendig für die Bestimmung der Grenzformänderung. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit [5] erfolgte eine ausführliche Betrachtung unterschiedlicher Ansätze. Im Folgenden soll die hier angewandte Auswertemethode vorgestellt werden.

Der verwendete Ansatz berücksichtigt den gesamten Bereich des späteren Werkstoffversagens und nicht einzelne Punkte oder Linienschnitte quer zum Riss. Als Bewertungskriterien dienen der starke Anstieg der lokalen Formänderung  $\phi_1$  im späteren Rissbereich und die damit verbundene Erhöhung der Formänderungsgeschwindigkeit, die zu unterschiedlichen Anstiegen der Formänderungsgradienten über der Zeit führen sowie die zunehmende Lokalisierung der Umformung. Die Vorgehensweise gestaltet sich im Wesentlichen wie folgt: Aus einer bis zum Riss führenden Videosequenz werden in den letzten Aufnahmen vor dem Riss gleiche Oberflächenbereiche im späteren Rissgebiet ausgewertet. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Formänderungsanstiege über der Zeit, indem punktweise die Werte der Formänderung  $\phi_1$  der absteigend aufeinanderfolgenden Aufnahmen subtrahiert werden (z. B. Aufnahme 98 – Aufnahme 96 usw.). Die in Bild 5 dargestellten Ergebnisbilder zeigen die Verteilung der über die Bildfrequenz normierten Formänderungsgeschwindigkeiten an den entsprechenden Kreuzungspunkten der Messraster.

Dabei ist zu erkennen, dass mit geringer werdendem zeitlichen Abstand zum Riss die Umformung sich im Wesentlichen nur noch auf einen ca. 2 Rastermaschen breiten Bereich konzentriert, der im weiteren Verlauf nochmals einen kleineren Bereich mit noch größeren lokalen Formänderungsgradienten hervorbringt. Da zu diesem Zeitpunkt wissentlich bereits eine lokale Einschnürung vorhanden ist, kann davon ausgegangen werden, dass jener Bereich diese Einschnürung darstellt. Wird die Ausbildung dieses Bereiches zurück verfolgt, kann der Beginn der lokalen Einschnürung mit hinreichender Genauigkeit festgestellt

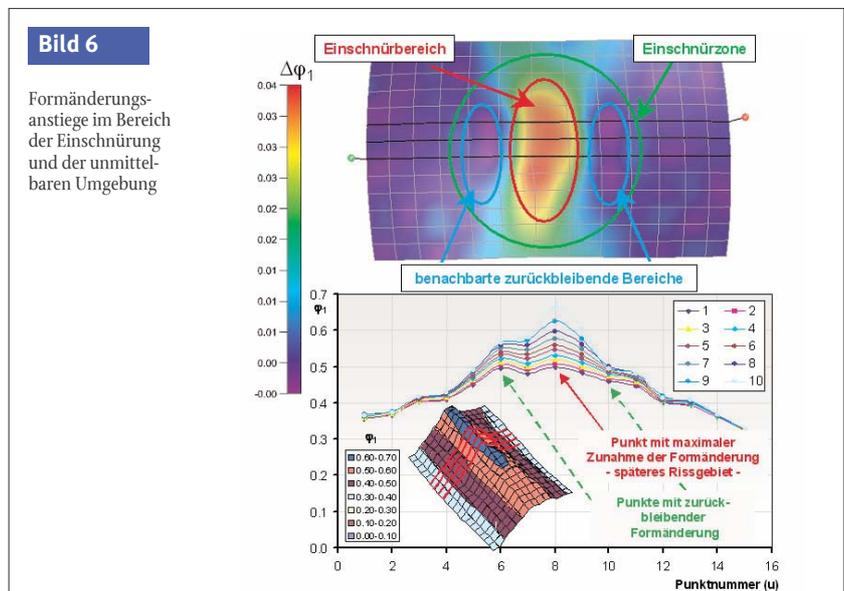
**Bild 5**

Gegenüberstellung der normierten Formänderungsgeschwindigkeiten



**Bild 6**

Formänderungsanstiege im Bereich der Einschnürung und der unmittelbaren Umgebung



werden. Im konkreten Beispiel wäre dies Aufnahme 94. Unter Berücksichtigung des momentanen Verzerrungszustandes der Rastermaschen kann die Breite des betrachteten Bereiches ermittelt werden und mit der blechdickenabhängigen Breite der sich ausbildenden lokalen Einschnürung verglichen werden. Mit dem Erreichen einer deutlichen Lokalisierung der Umformung in diesem Bereich kann der Beginn der lokalen Einschnürung hinreichend genau beschrieben werden.

Die vorgestellte Methode hat sich bei der Auswertung der Tiefungsversuche bewährt, vorteilhaft ist die einfache Anwendbarkeit anzumerken. Nachteilig ist dabei die nicht vorhandene Möglichkeit einer durchgängigen

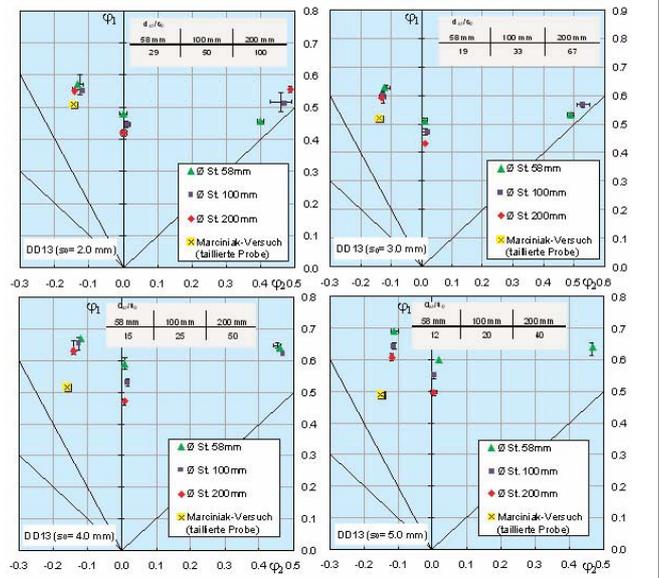
Automatisierbarkeit und der somit vorhandene subjektive Einfluss des Bedieners zu nennen. Die Bestimmung der auszuwertenden Aufnahme vor Beginn der lokalen Einschnürung wird mit Hilfe der berechneten Formänderungsgeschwindigkeiten erleichtert, kann aber nicht automatisch vorgenommen werden. Die Ermittlung relevanter Kriterien ist aktueller Forschungsgegenstand. In Bild 6 wird ein vielversprechender Effekt für einen neuen Ansatz der zeitbezogenen Vorgehensweise dargestellt. Die abgebildeten Verläufe stellen die Entwicklung der Formänderung  $\phi_1$  quer zum Einschnürbereich in den letzten 10 Aufnahmen vor dem Riss der Probe dar. Neben der fortschreitenden Zunahme

der Formänderung im späteren Rissbereich ist ein zurückbleibender Bereich in unmittelbarer Nähe dazu festzustellen. Die Abnahme der Formänderungsgeschwindigkeit in diesen Bereichen ist ein Anzeichen für die beginnende Lokalisierung der Umformung (Beginn der zum Riss führenden Einschnürung) [6, 7] und stellt somit die Grenzformänderung dar. Der reproduzierbare Anwendung des vorgestellten Effektes ist Inhalt laufender Untersuchungen.

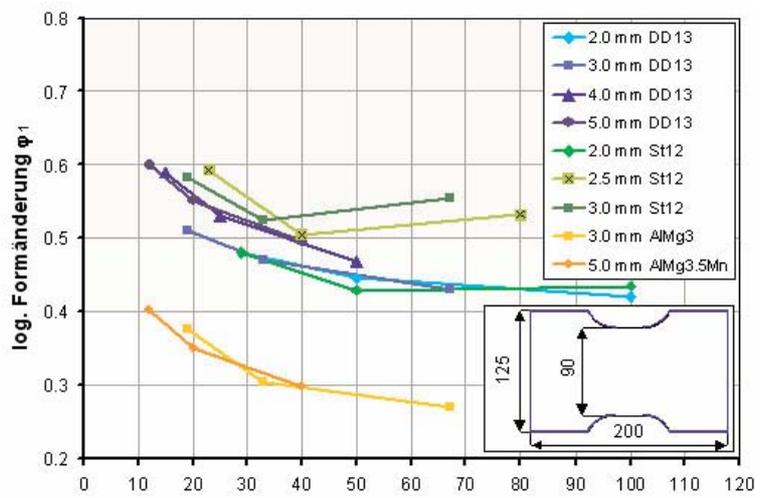
**Darstellung ausgewählter Ergebnisse**

In den Diagrammen des Bildes 7 sind auszugsweise Versuchsergebnisse der Serien mit dem Werkstoff DD13 abgebildet. Die sich aus der Blechdicke des jeweiligen Werkstoffes und den verwendeten Stempeldurchmessern ergebenden Verhältnisse von Stempeldurchmesser zu Blechdicke ( $d_{St}/s_0$ ) sind in jedem Diagramm in Form einer Tabelle zusammengestellt. In jeder Versuchsreihe wurden drei unterschiedliche Probengeometrien mit jeweils 2 bis 4 Einzelversuchen umgeformt. In den Diagrammen ist neben dem Mittelwert aller Einzelversuche pro Probenform jeweils die Spannweite dieser Versuchsreihe in Richtung der Haupt- und Nebenformänderung dargestellt. Damit wird ersichtlich, in welchem Bereich die ermittelten Ergebnisse der jeweiligen Proben liegen und inwiefern sie sich mit den Spannweiten anderer Versuche überdecken. Die aus den verwendeten Probenformen resultierenden Formänderungsverteilungen belegen die Belastungspfade Zug ( $\varphi_2 < 0$ ), Plane Strain ( $\varphi_2 = 0$ ) und den biaxialen Zug ( $\varphi_2 > 0$ ). Die mit den drei Stempeldurchmessern erzielten Ergebnisse sind durch unterschiedliche Symbole getrennt dargestellt, die Zuordnung der Probenformen erfolgt über deren Lage im Grenzformänderungsdiagramm. Im Bereich des einachsigen Zuges ist der Einfluss des abnehmenden Verhältnisses von Stempeldurchmesser zu Blechdicke gut zu erkennen. Bei  $s_0 = 2$  mm liegen die Ergebnisse aller Versuchsreihen eng beieinander. Mit abnehmendem Verhältnis  $d_{St}/s_0$  rücken die Ergebnisse weiter auseinander und ordnen sich, beginnend mit dem kleinsten

**Bild 7**  
Versuchsergebnisse



**Bild 8**  $\varphi_1$ -Werte aller Verhältnisse  $d_{St}/s_0$  für den Belastungspfad Plane Strain



Verhältnis von  $d_{St}/s_0$ , absteigend an. Im Bereich Plane Strain verstärkt sich dieser Effekt noch. Im Bereich des biaxialen Zuges zeigen die ermittelten Ergebnisse keine eindeutige Tendenz. Der Grund dafür konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden und ist gegenwärtiger Forschungsgegenstand. Die Ergebnisse der Stichversuche mit dem Marciniak-Stempel unter Verwendung identischer Probengeometrien für alle Blechdicken sind ebenfalls in Bild 7 enthalten. Aufgrund der Reibungs- und Krümmungsfreiheit der Marciniak-Proben im auszuwertenden Bereich sind diese frei vom Einfluss des Verhältnisses Stempeldurchmesser zu Blechdicke.

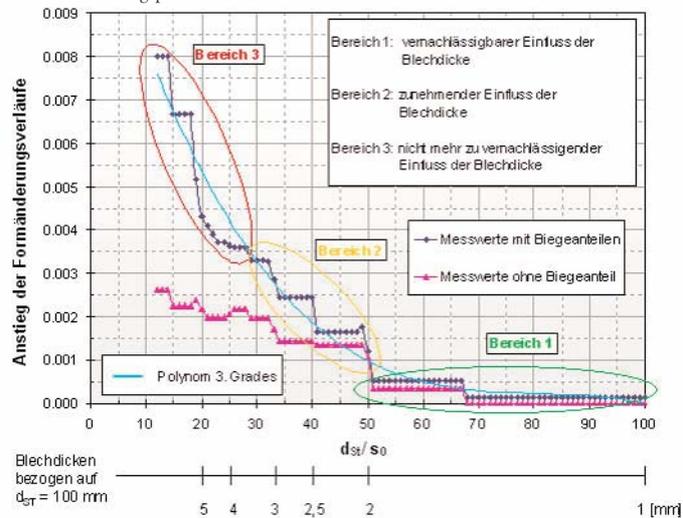
Dies belegt der Vergleich mit den Formänderungen, die in den Tiefungsversuchen mit dem Stempel 200 ermittelt wurden. Bei einem Verhältnis von  $d_{St}/s_0 = 100$  ( $s_0 = 2$  mm) liegen die Werte relativ dicht beieinander. Mit abnehmendem Verhältnis und somit zunehmender Blechdicke vergrößert sich dieser Abstand ständig. Außerdem stimmen die in den Marciniak-Versuchen ermittelten Grenzformänderungen über alle Blechdicken betrachtet gut überein.

In Bild 8 sind die Ergebnisse aller untersuchten Werkstoffe für den Belastungsfall Plane Strain zusammengestellt. Die gewählte Darstellungsart zeigt die ermittelten Formänderungen

für die entsprechenden Verhältnisse  $d_{St}/s_0$  in Abhängigkeit vom untersuchten Werkstoff. Bis auf wenige Ausnahmen ist mit abnehmendem Verhältnis  $d_{St}/s_0$  ein Anstieg der Werte der Formänderung  $\phi_1$  zu verzeichnen. Für eine werkstoffunabhängige Aussage zum Einfluss des Verhältnisses  $d_{St}/s_0$  erfolgt die Mittlung der Anstiege aller Funktionen der im Bild 8 jeweils belegten Wertebereich. Der so ermittelte Verlauf ist in Bild 9 (Messwerte mit Biegeanteil) dargestellt (Messwerte ohne Biegeanteil s. u.) und beschreibt die Zunahme der Formänderung  $\phi_1$  über den Bereich der Verhältnisse  $d_{St}/s_0$  von 12 bis 100. Im Bereich von 100 bis 50 ist kaum ein Anstieg zu verzeichnen, so dass hier der Einfluss der Blechdicke vernachlässigbar ist. Der weitere Verlauf zeigt einen zunehmend stärkeren Anstieg der Funktion, so dass die in Bild 9 vorgenommene Unterteilung in zwei weitere Bereiche gerechtfertigt ist. Für die Verwendung des Stempels 100 ist somit zu entnehmen, dass bei Blechen bis zu einer Dicke von 2 mm nur ein geringer Einfluss der Blechdicke vorhanden ist. Darüber hinaus, bis zu einer Dicke von ca. 3,5 mm, ist eine zunehmende Beeinflussung feststellbar. Mit weiter zunehmender Blechdicke tritt eine nicht mehr zu vernachlässigende Erhöhung der ermittelten Formänderung  $\phi_1$  auf. Der Anwendungsbereich des Stempels 100 sollte demnach auf Blechdicken bis ca. 3,5 mm beschränkt werden.

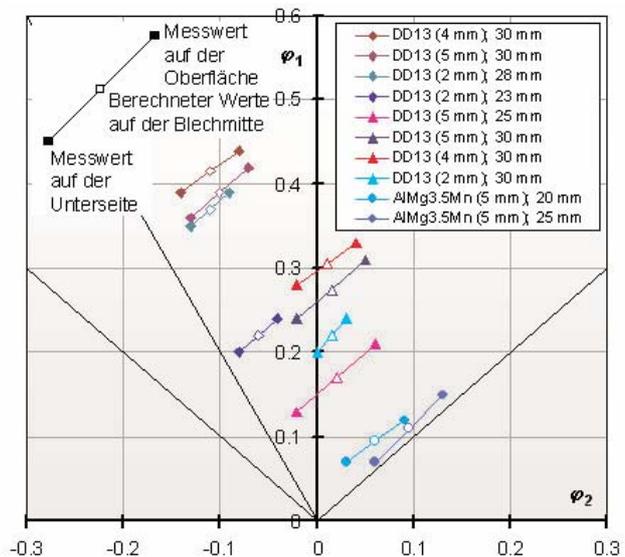
Um die Anwendbarkeit des Standardwerkzeuges Stempels 100 auch für größere Blechdicken erweitern zu können, soll nachfolgend ein Ansatz vorgestellt werden, mit dem eine näherungsweise Korrektur der Ergebnisse in Abhängigkeit von der Blechdicke erfolgen könnte. Die in Bild 9 gezeigten Zusammenhänge resultieren aus der Vermessung der Probenoberfläche und schließen somit alle Einflüsse, die von der untersuchten Blechdicke herrühren, in sich ein. Beim Anlegen des Bleches an die Stempelkontur erfährt ein dickeres Blech eine stärkere Dehnung auf der dem Stempel abgewandten Seite als ein dünneres, was sich nochmals mit der Verwendung kleiner werdender Stempeldurchmesser verstärkt. Zur Untersuchung dieser Zusammenhänge werden zunächst einige Probenzuschnitte beidseitig mit

**Bild 9** Gemittelte Anstiege der Formänderungen in Abhängigkeit vom Verhältnis  $d_{St}/s_0$  für den Belastungspfad Plane Strain



**Bild 10**

Auf der Außen- und Innenseite ermittelte Formänderungen



einem Messraster (Rasterkonstante 2 mm) versehen und anschließend stufenweise über dem Stempel 100 umgeformt. Die Bestimmung der Formänderungen erfolgte beidseitig jeweils im Kuppenpol durch Mittelwertbildung über 9 Rasterkreuzungspunkte. Die auf diese Art gemessenen Formänderungen sind in Bild 10 dargestellt. Die Bezeichnung der Datenreihen beinhaltet den Werkstoff, die Blechdicke und den zurückgelegten Stempelweg. Die jeweils zugrunde liegende Probenform ist an der Lage der gemessenen Formänderungen im Diagramm und entsprechend unterschiedliche Symbole erkennbar. In der Darstellung zeichnet sich ein Streckziehanteil ab, der zu ei-

ner Verschiebung der Formänderungen unter einem Winkel von ca. 45° führt. Die Größe der Differenz zwischen Außen- und Innenseite der Probe hängt von der momentanen Blechdicke ab, was sich im Vergleich der Ergebnisse von Proben gleicher Ausgangsblechdicke und zunehmendem Stempelweg (DD13  $s_0 = 2$  mm) bzw. prinzipiell bei unterschiedlicher Ausgangsblechdicke zeigt.

Die auf den Oberflächen der Proben gemessenen Formänderungen werden demnach in Abhängigkeit vom Verhältnis  $d_{St}/s_0$  durch überlagerte Biegeanteile erhöht. Durch die Berechnung der Größenordnung dieser Anteile soll eine auf den Grundlagen der elemen-

taren Biegetheorie basierende Korrektur der Versuchsergebnisse erfolgen. Im Bereich des Plane Strains wird dieser Biegetheorie weitestgehend entsprochen, da nur in Richtung der Hauptformänderung  $\varphi_1$  der Werkstofffluss erfolgt (senkrecht zur Biegekannte), Nebenformänderung  $\varphi_2 = 0$ . In Bild 11 sind beispielhaft für den Werkstoff DD13 ( $s_0 = 5 \text{ mm}$ ) die um den Biegeanteil verringerten Werte der Formänderung  $\varphi_1$  dargestellt. Der in Abhängigkeit vom Verhältnis von Stempeldurchmesser zu Blechdicke ermittelte Biegeanteil wird dabei von allen ermittelten  $\varphi_1$ -Werten (alle Belastungspfade) subtrahiert, da sich die Vergrößerung der Blechdicke (Verkleinerung des Verhältnisses  $d_{St}/s_0$ ) erfahrungsgemäß in einer Verschiebung der gesamten Grenzformänderungskurve zu höheren Werten der Formänderung  $\varphi_1$  widerspiegelt.

Der Abzug der Biegeanteile bewirkt eine relativ gute Übereinstimmung der Ergebnisse mit denen des Stempels 200, der mit einem Verhältnis von  $d_{St}/s_0 = 40$  nach Bild 9 den Bereich 2 (zunehmender Einfluss der Blechdicke) belegt. Somit sind diese Ergebnisse mit denen aus Versuchsreihen mit Verhältnissen  $d_{St}/s_0 \geq 33$  näherungsweise vergleichbar. In Bild 9 sind die gemittelten Anstiege der um den Biegeanteil reduzierten Formänderungsverläufe denen der reinen Messwerte gegenübergestellt. Mit der Abnahme des Verhältnisses  $d_{St}/s_0$  ist ebenfalls ein Anstieg der Formänderung zu erkennen, der allerdings nicht die Größenordnung der Messwerte mit Biegeanteil erreicht. Da laut Normungsvorschlag die Durchführung der Versuche zur experimentellen Bestimmung der Grenzformänderungskurve über den Stempel 100 erfolgen sollen, ist bei Blechen der Dicke  $s_0 = 5 \text{ mm}$  das minimale Verhältnis  $d_{St}/s_0 = 20$ . Dafür liegt der Verlauf der gemittelten Anstiege in Bild 9 sicher im Bereich 2, so dass eine näherungsweise Vergleichbarkeit mit Werten größerer Verhältnisse  $d_{St}/s_0$  gegeben ist. Mit dieser Vorgehensweise kann annähernd eine Basis geschaffen werden, auf deren Grundlage eine Vergleichbarkeit der Grenzformänderungskurven von Werkstoffen unterschiedlicher Blechdicken möglich ist. Die vorgeschlagene Herangehensweise kann allerdings nur als Näherung an-

gesehen werden, da trotz der Berücksichtigung der Biegeanteile die gemittelten Anstiege der Formänderungen in Bild 9 eine Abhängigkeit vom Verhältnis  $d_{St}/s_0$  zeigen.

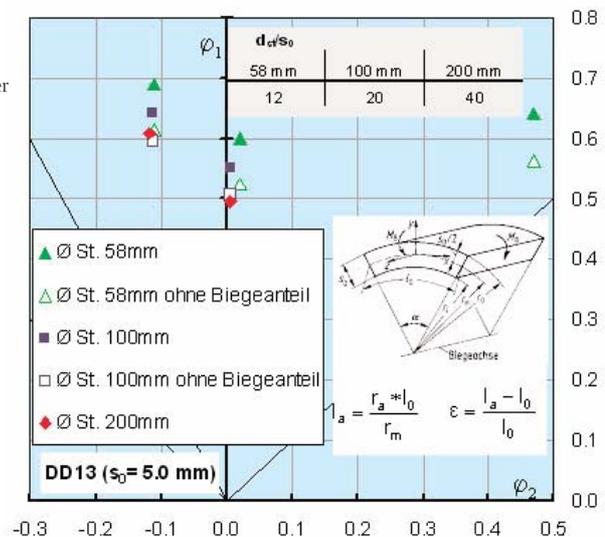
### Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die Vorgehensweisen für die experimentelle Ermittlung der Grenzformänderungskurve für Bleche im Dickenbereich von 2,5 bis 5,0 mm erarbeitet. Die Schwerpunkte lagen dabei in der Anpassung der Versuchsparameter, dem Entwickeln/Herleiten eines praktikablen Instabilitätskriteriums, mit dessen Hilfe der Beginn der lokalen Einschnürung (bei der zeitbezogenen Auswertung) zuverlässig und reproduzierbar bestimmt werden kann. Darüber hinaus wurden Untersuchungen zur bekannten Verschiebung der Grenzformänderungskurven zu höheren Werten bei zunehmender Blechdicke durchgeführt und Maßnahmen zur Kompensation dieser Blechdickenabhängigkeit ausgearbeitet. Die gebräuchlichste Vorgehensweise bei der experimentellen Ermittlung der Grenzformänderungskurve stellt das Umformen unterschiedlich taillierter Probenformen mit einem halbkugelförmigen Stempel (Durchmesser 100 mm) dar. Für diesen Versuchsaufbau erfolgte die Anpassung der wichtigsten Versuchsparameter wie Tribologie, Klemmung der Proben und Probengeometrie, da diese den Werkstoff-

fluss maßgeblich beeinflussen. Es wurden Vorgaben erarbeitet, die eine erfolgreiche Versuchsdurchführung auch bei erhöhten Blechdicken ermöglichen. Mit dem vorgestellten Instabilitätskriterium wurden die durchgeführten Versuchsreihen zuverlässig und reproduzierbar ausgewertet. Allerdings ist die beschriebene Vorgehensweise nicht frei von subjektiven Einflüssen und in der vorliegenden Form nicht vollständig mathematisch beschreibbar, so dass eine Automatisierung der Auswertung nicht möglich ist. Ein neuer Ansatz, der den formulierten Anforderungen gerecht wird, wurde vorgestellt. Die Untersuchung des Einflusses der Blechdicke auf die Lage der Grenzformänderungskurve erfolgte anhand der sich ändernden Verhältnisse von Stempeldurchmesser zu Blechdicke in der Form, dass gleiche Werkstoffe mit Stempeln unterschiedlicher Durchmesser (58 mm, 100 mm und 200 mm) geprüft wurden, um den Einfluss von Chargenschwankungen auszuschließen. Für die Versuche mit dem Stempeldurchmesser 200 mm wurde ein spezielles Ziehwerkzeug entwickelt, während die anderen Versuche mit handelsüblichen Werkzeugen in einer kommerziellen Blechprüfmaschine durchgeführt wurden. Als Ergebnis der durchgeführten Versuchsreihen konnte festgestellt werden, dass Bleche bis zu einer Dicke von ca. 3 mm mit dem halbkugelförmigen Stempel (Durchmesser 100 mm) geprüft werden können, bei

**Bild 11**

Um den Biegeanteil reduzierte Werke der Formänderung ...



kleiner werdendem Verhältnis von Stempeldurchmesser zu Blechdicke steigen die Werte der Formänderung  $\varphi_1$  sehr stark an. Unter Berücksichtigung der blechdickenabhängigen Krümmung der Probenoberfläche wurden die überlagerten Biegeanteile bestimmt und die Ergebnisse um diese reduziert. Die daraus resultierenden Werte zeigen eine deutlich geringere Abhängigkeit vom zugrunde liegenden Verhältnis von Stempeldurchmesser zu Blechdicke. Daraus wird ersichtlich, dass die bisher festgestellte blechdickenabhängige Verschiebung der Grenzformänderungskurven maßgeblich von der dem Tiefungsvorgang überlagerten Biegung der Bleche abhängig ist. Dies konnte ebenfalls durch die Ergebnisse der Stichversuche mit dem Marciniak-Stempel belegt werden.

## Literatur

- [1] Lange, K.: Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Bd.3 Blechbearbeitung, völlig neuberarb. und erw. Aufl., Springer-Verlag Heidelberg New York Tokyo Hong Kong, 1990
- [2] Liebertz, H. et. Al.: Guideline for the determination of forming limit curves, IDDRIG Conference, Sindelfingen, Germany, 2004
- [3] Voelkner, W.; Lachmann, L.; Feldmann, P.; Schatz, M.; Andresen, K.: Mehr als visioplastische Visionen. Formänderungs- und Spannungsanalyse mit in Ziehwerkzeugen integrierter Bildverarbeitung, Bänder Bleche Rohre, Band 41 (2000) Heft 4, S. 58-61
- [4] Bischoff, W.: Die Anisotropie der Tiefziehbleche. Blech Rohre Profile, 25 (1978) 12, S. 601- 606
- [5] Thoms, V.; Schatz, M.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Grenzformänderungskurve von dicken Blechwerkstoffen ( $s_0 = 2,5 - 5\text{mm}$ ), EFB-Forschungsbericht, Europ. Forsch.-Ges. für Blechverarbeitung, Band 220 (2004)
- [6] Marciniak, Z.: Sheet Metal Forming Limits, in Mechanics of Sheet Metal Forming, ed. By Koistinen, D.P. and Wang, N.-M., Plenum Press, New York - London, S. 215- 235, 1978
- [7] Till, E.T.: Einflussgrößen auf Grenzformänderungen in Stahlblechen Fortschritt- Berichte VDI, Reihe 2 Fertigungstechnik, Nr.575, Düsseldorf 2001

## Autoren

- Dipl.-Ing. Marko Schatz studierte Maschinenbau mit der Fachrichtung Produktionstechnik/ Fertigungsverfahren und Werkzeuge an der TU Dresden. Seit 1997 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umform- und Umformtechnik tätig.
- Dr.-Ing. Stefan Keller studierte Allgemeinen Maschinenbau an der Universität Siegen und promovierte dort am Institut für Fertigungstechnik auf dem Gebiet der Umformtechnik. Seit 1996 arbeitet er bei der Firma Hydro Aluminium Deutschland GmbH und ist dort in der Forschung und Entwicklung für den Bereich Blechumformung zuständig.
- Dipl.-Ing. Peter Feldmann studierte Maschinenbau an der TU Dresden. Daran schloss sich eine langjährige Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umform- und Umformtechnik bei Prof. Erberlein und Prof. Voelkner an. Seit 2001 ist er in der Firma ViALUX Messtechnik + Bildverarbeitung GmbH tätig und für das Formänderungsanalyse-System AutoGrid verantwortlich.